

Исследование режимов виброкипящего гранулированного слоя с использованием пакета OpenFOAM

^{1,2,3} Н.С. Орлова <norlova.umi.vnc@gmail.com>

² Я.Н. Качалкина <yankevich-2502@mail.ru>

¹ Южный математический институт Владикавказского научного центра
РАН и Правительства РСО-А,
Россия, Владикавказ, ул. Маркуса, 22;

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный
технологический университет),
Россия, Владикавказ, ул. Николаева, 44;

³ Финансовый университет при Правительстве РФ, Россия, Владикавказ, ул.
Молодежная, 7.

Аннотация. Виброкипение широко используется в различных технологических процессах. В связи с этим исследование режимов виброкипания является актуальным. В работе проведено исследование режимов виброкипящего слоя с использованием пакета OpenFOAM. Представлены результаты моделирования динамики виброкипящего слоя частиц стекла при различных значениях амплитуды и частоты колебаний, толщины слоя засыпки. Выявлены режимы, при которых слой теряет устойчивость, и образуются всплески гранулированного материала и фонтанирующие каналы.

Ключевые слова: виброкипящий слой, гранулированный материал, математическое моделирование, OpenFOAM, twoPhaseEulerFoam, режимы виброкипания

1. Введение

В настоящее время имеющиеся модели виброкипания описывают поведение движения двухфазных сред только при определенных условиях [1-3], т.е. имеют различные области применения, которые зависят от входных параметров (толщина слоя засыпки материала, размер твердых частиц, амплитуда и частота колебаний полки, на которой располагается материал, и т.д.). Разработка универсальной трехмерной модели виброкипящего слоя имеет практическую значимость, так как за счет увеличения площади поверхности контакта фаз виброкипение широко используется в различных технологических процессах: очистка газов, химические технологии, сушка гранулированного материала. Несмотря на огромное практическое значение и

разнообразие работ в этом направлении, общепринятой универсальной модели пока нет.

В данной работе представлены результаты моделирования динамики виброкипящего слоя с использованием свободно распространяемого пакета для решения прикладных задач гидро и аэромеханики OpenFOAM при поддержке программы "Университетский кластер" с удаленным доступом к консоли на управляющем узле вычислительного кластера BL2×220 [4]. Для описания процесса виброкипения был доработан решатель twoPhaseEulerFoam, который использовался для моделирования динамики кипящего гранулированного слоя [5]. В решателе twoPhaseEulerFoam реализована двухжидкостная модель кипящего (ожиженного) слоя на основе континуального подхода (подхода Эйлера), при котором движение слоя рассматривается как движение двух взаимодействующих континуумов, связанных с газом и частицами. Основные уравнения двухжидкостной модели - уравнения неразрывности и уравнения количества движения для обеих фаз [5-8].

2. Постановка задачи

Для моделирования динамики виброкипящего слоя был доработан решатель twoPhaseEulerFoam, в котором вместо использования абсолютной системы отсчета для пространственных координат вводилась относительная система отсчета, движущаяся вместе с контейнером (полкой, на которой располагается слой материала). Предполагалось, что стенки контейнера не деформируются и перемещаются как твердое тело. В этой движущейся системе отсчета нет движения стенок. Таким образом, вычислительная сетка является статической в движущейся неинерциальной системе отсчета, что значительно упрощает процедуру численного решения уравнений. Концептуально, результаты должны быть эквивалентны результатам, полученным из решения основных уравнений в инерциальной системе координат с использованием сетки, которая движется со стенками. Поскольку рассматриваются вертикальные вибрации, считается, что будет меняться только вертикальная координата y . В связи с этим уравнения количества движения для обеих фаз примут следующий вид [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_\phi \bar{U}_\phi) + \nabla \cdot (\alpha_\phi \bar{U}_\phi \bar{U}_\phi) + \nabla \cdot (\alpha_\phi \bar{R}_{\phi, eff}) = -\frac{\alpha_\phi}{\rho_\phi} \nabla P + \alpha_\phi (\bar{g} - \bar{a}) + \bar{M}_\phi; \quad (1)$$

где $\bar{a}$ - ускорение колебаний полки (стенки), на которой располагается слой материала. Т.к. рассматриваются только вертикальные колебания (вибрации), то ускорение колебаний определяется вертикальной составляющей

$\vec{a} = (a_x, a_y, a_z) = (0, a_y, 0)$, где $a_y = -A\omega^2 \sin(\omega t)$, $\omega = 2\pi f$ (A - амплитуда колебаний, f - частота колебаний).

Кроме того, решалось уравнение неразрывности (2) для обеих фаз.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_\varphi) + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \vec{U}_\varphi) = 0; \quad (2)$$

Индекс φ означает принадлежность к фазе (твердой «a» или газовой «b»); α_φ - объемная доля соответствующей фазы; ρ_φ - плотность фазы; $\vec{U}_\varphi$ - вектор скорости фазы; $\vec{R}_{\varphi,eff}$ - тензор эффективных напряжений; P - давление газовой фазы; $\vec{g}$ - ускорение свободного падения; $\vec{M}_\varphi$ - член, моделирующий обмен импульсом между фазами. Выражения для нахождения коэффициентов и членов, входящих в уравнения (1-2), подробно описаны в литературе [6-8].

В решателе twoPhaseEulerFoam обе фазы считаются несжимаемыми. Для газовой фазы реализована полуэмпирическая двухпараметрическая модель турбулентности $k - \varepsilon$ [5,6]. Член, моделирующий обмен импульсом между фазами, определяется силами трения, возникающими между двумя фазами:

$$\vec{M}_\varphi = \frac{1}{\rho_\varphi} \vec{M}_{drag},$$

$$\vec{M}_{drag} = \alpha_a \alpha_b K \vec{U}_r,$$

где K - функция сопротивления, которая зависит от объемной доли газовой фазы. При $\alpha_b \leq 0.8$ функция сопротивления определяется по формуле (3), а при $\alpha_b > 0.8$ - по формуле (4) [6-8].

$$K = 150 \frac{\alpha_a \mu_b}{(\alpha_b d_a)^2} + 1.75 \frac{\rho_b |\vec{U}_r|}{\alpha_b d_a}, \quad (3)$$

$$K = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_b |\bar{U}_r|}{d_a}, \quad (4)$$

где $\bar{U}_r = \bar{U}_a - \bar{U}_b$ - относительная скорость фаз, d_a - диаметр частиц, μ_b - динамическая вязкость газа, C_D - коэффициент сопротивления.

Для учета эффектов, обусловленных взаимодействием частиц друг с другом, используется кинетическая теория (по аналогии с кинетической теорией газа), с помощью которой можно выразить эффективные напряжения, возникающие в дисперсной фазе за счет движения частиц и за счет столкновений частиц друг с другом. По аналогии с термодинамической температурой, вводится гранулярная температура θ , как средняя энергия флуктуаций скорости частиц. В решателе для расчета гранулярной температуры используется алгебраическое уравнение (5) [7].

$$\theta = \left(\frac{-(K_1 \alpha_a + \rho_a) \text{tr}(\bar{D}_s) + \sqrt{(K_1 \alpha_a + \rho_a)^2 \text{tr}^2(\bar{D}_s) + 4K_4 \alpha_a \left[2K_3 \text{tr}(\bar{D}_s) + K_2 \text{tr}^2(\bar{D}_s) \right]}}{2\alpha_a K_4} \right)^2, \quad (5)$$

В уравнении (5) $\bar{D}_s$ - тензор скоростей деформации твердой фазы, коэффициенты $K_1 - K_4$ определяются следующим образом:

$$\bar{D}_s = \frac{1}{2} \left[\nabla \bar{U}_a + (\nabla \bar{U}_a)^T \right],$$

$$K_1 = 2(1+e)\rho_a g_0,$$

$$K_2 = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} d_a \rho_a (1+e) \alpha_a g_0 - \frac{2}{3} K_3,$$

$$K_3 = \frac{d_a \rho_a}{2} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{3(3-e)} \left[1 + \frac{2}{5} (1+e)(3e-1) \alpha_a g_0 \right] + \frac{8\alpha_a}{5\sqrt{\pi}} g_0 (1+e) \right),$$

$$K_4 = \frac{12(1-e)^2 \rho_a g_0}{d_a \sqrt{\pi}},$$

$$g_0 = \frac{3}{5} \left[1 - \left(\frac{\alpha_a}{\alpha_{a \max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1},$$

где g_0 - радиальная функция контакта, $\alpha_{a \max}$ - максимальное значение объемной доли частиц, e - коэффициент восстановления в случае столкновений частица-частица. Более подробное описание коэффициентов представлено в работах [7,8].

3. Начальные и граничные условия

Задача решалась в трехмерном приближении. В связи с тем, что введена относительная система отсчета, используются следующие начальные условия:

$$\bar{U}_a = 0; \bar{U}_b = 0; P = 0; \alpha_a = 0,6; \theta = 0.$$

Далее представлены граничные условия на левой, правой, передней и задней стенках, а также на нижней стенке (полке):

$$\bar{U}_a = 0; \bar{U}_b = 0; \nabla P = 0; \nabla \alpha_a = 0; \nabla \theta = 0.$$

Граничные условия на верхней свободной поверхности:

$$\nabla \bar{U}_a = 0; \nabla \bar{U}_b = 0; \nabla P = 0; \nabla \alpha_a = 0; \nabla \theta = 0.$$

Размеры вычислительной области: высота - 0,4 м, ширина - 0.4 м, толщина - 0.4 м. Процесс виброкипения рассчитывался за 2 с. При этом использовался шаг по времени, равный 1×10^{-4} с. Шаг по координате x равен 0.005 м, шаг по координате y - 0.005 м, шаг по координате z равен 0.005 м. Проводилось распараллеливание вычислений на 12 ядрах. В таблице 1. представлены

значения входных параметров задачи. В качестве твердой фазы были выбраны сферические частицы стекла.

Табл. 1. – Значения входных параметров задачи.

	Описание	Значение
1	плотность твердой фазы (частицы стекла), ρ_a [кг/м ³]	2600
2	плотность газовой фазы (воздуха), ρ_b [кг/м ³]	1,2
3	вязкость газовой фазы (воздуха), μ_b [Па×с]	$1,5 \times 10^{-5}$
4	коэффициент восстановления частица-частица, e [-]	0,9
5	начальное значение объемной доли частиц в слое, α_{a0} [-]	0,6
6	начальная высота слоя, H_0 [м]	0,05-0,1
7	ширина слоя, L [м]	0,4
8	толщина слоя, W [м]	0,4
9	диаметр частиц, d_a [м]	0,0003

4. Результаты расчетов

С использованием разработанной трехмерной модели виброкипящего слоя было проведено исследование режимов виброкипания. Расчеты проводились при значениях амплитуды колебаний в диапазоне $A = 1,5 - 9$ мм, частоты колебаний в диапазоне $f = 20 - 60$ Гц при значениях начальной толщины слоя частиц $50 - 100$ мм. В результате серии трехмерных вычислительных экспериментов с распараллеливанием на супер-ЭВМ наблюдается волнообразная поверхность гранулированного материала. С увеличением амплитуды и частоты колебаний слой частиц теряет устойчивость и образуются всплески гранулированного материала.

На рис. 1 представлены результаты моделирования динамики виброкипящего слоя в момент времени $1,5$ с при различных значениях амплитуды колебаний A и при частоте колебаний $f = 20$ Гц для слоя с толщиной засыпки 50 мм.

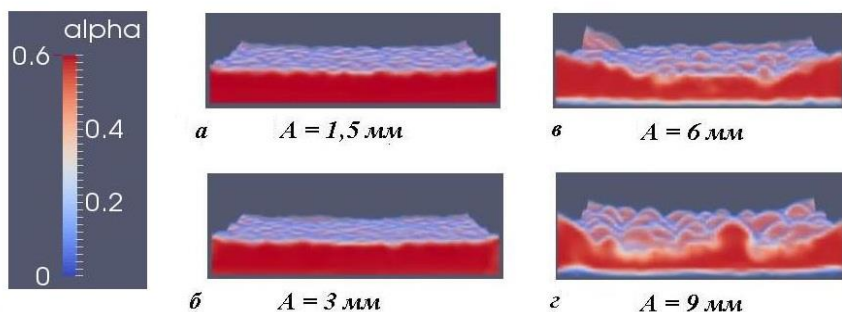


Рис. 1. Структура вибрирующего слоя при разных значениях амплитуды колебаний.

Из рис. 1 видно, что с увеличением амплитуды колебаний $A > 3$ мм начинают появляться всплески гранулированного материала, а при амплитуде $A = 9$ мм всплески больше похожи на фонтанирующие каналы.

На рис. 2 представлены аналогичные результаты, полученные при частоте колебаний $f = 40$ Гц.

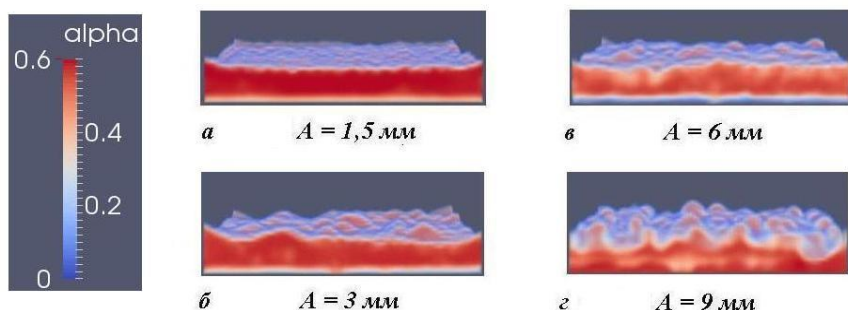


Рис. 2. Структура вибрирующего слоя при разных значениях амплитуды колебаний.

В отличие от предыдущего случая (рис. 1) всплески гранулированного материала появляются уже при амплитуде колебаний $A = 3$ мм. А при амплитуде $A = 9$ мм наблюдаются явно выраженные фонтанирующие каналы.

Очевидно, что образование всплесков в большей степени зависит от амплитуды колебаний, чем от частоты. Они начинают появляться при значениях амплитуды $A > 2$ мм. При значениях амплитуды колебаний $A > 6$ мм в слое наблюдаются локализованные фонтанирующие каналы.

С дальнейшим увеличением частоты колебаний (до 60 Гц) при высоких значениях амплитуды (> 6 мм) количество фонтанирующих каналов

возрастает, зазор между нижней частью слоя и полкой (на которой располагается материал) становится больше.

Вычислительные эксперименты проводились и для более толстых слоев (с толщиной засыпки до 100 мм). На рис. 3 представлены результаты сравнения степени расширения виброкипящего слоя с толщиной засыпки 50 мм (кривая 1) и 100 мм (кривая 2) при частоте колебаний 20 Гц и при амплитуде колебаний 1,5 - 9 мм.

H_{max}/H

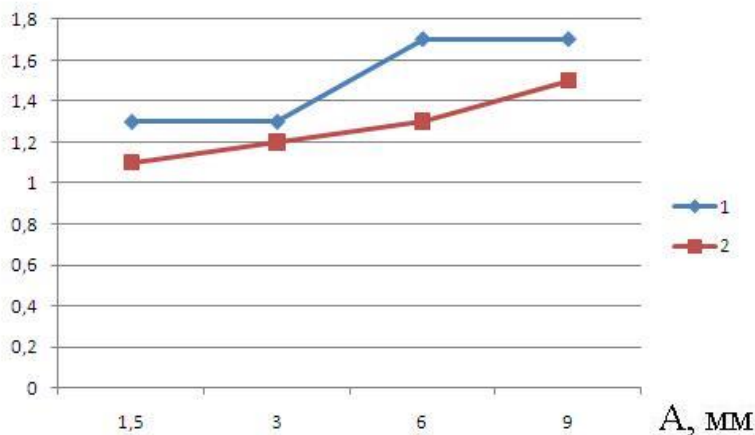


Рис. 3. Степень расширения виброкипящего слоя

Качественно результаты расчетов, полученные при различных значениях амплитуды и частоты колебаний для слоя с толщиной засыпки 100 мм мало отличаются от результатов, полученных для слоя с толщиной 50 мм. С увеличением амплитуды и частоты колебаний в слое наблюдаются всплески (при $A > 2$ мм) и фонтанирующие каналы (при $A > 6$ мм). Но степень расширения более толстого слоя (100 мм) меньше, чем степень расширения относительно тонкого (50 мм), как видно из рис. 3.

5. Заключение

В результате серии вычислительных экспериментов наблюдается волнообразная поверхность гранулированного материала. С увеличением амплитуды и частоты колебаний слой частиц теряет устойчивость и образуются всплески гранулированного материала. Образование всплесков в большей степени зависит от амплитуды колебаний, чем от частоты. Они начинают появляться при значениях амплитуды $A > 2$ мм. При значениях 150

амплитуды колебаний $A > 6$ мм в слое наблюдаются локализованные фонтанирующие каналы.

Таким образом, в результате моделирования виброкипящего слоя с использованием пакета OpenFOAM исследованы режимы виброкипения. Выявлены режимы, при которых слой теряет устойчивость и образуются всплески гранулированного материала и фонтанирующие каналы.

Список литературы

- [1]. Н.С. Орлова. Тестирование двух моделей виброожиженного слоя. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. №2, 2012 г. стр.42-45.
- [2]. Н.С. Орлова. Сравнение расчетов по двухжидкостной модели виброожиженного слоя с экспериментальными данными. Инженерно - физический журнал. том 85, №6, 2012 г. стр.1202-1207.
- [3]. Н.С. Орлова. Сравнение результатов экспериментального исследования виброкипящего слоя с расчетами по гидродинамической модели гранулярного газа. Инженерно- физический журнал. Т. 87, № 2, 2014. стр. 429-435.
- [4]. Консоль на управляющий узел кластера (2012), "BL2x220 Cluster Console" // URL: <https://unihub.ru/resources/bl2x220cc> (дата обращения: 10.06.2014).
- [5]. Е.С. Каменецкий, Н.С. Орлова, М.В. Волик, Д.Г. Минасян. Исследование динамики кипящего гранулированного слоя с использованием пакета OpenFoam. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. №5, 2014 г. стр. 37 – 42.
- [6]. H. Rusche. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. 2002. 343 p.
- [7]. B. van Wachem. Derivation, Implementation, and Validation of Computer Simulation Models for Gas-Solid Fluidized Beds – Dissertation at Delft University of Technology. 2000. 222 p.
- [8]. D. Gidaspow. Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions. Boston: Academic Press Inc., 1994. 211 p.
- [9]. N.S. Orlova, M.V. Volik. Modelling of vibrofluidized bed dynamics using OpenFoam. Waves and vortices in complex media: 5-th International Scientific School of Young Scientists, November 25-28, 2014, Moscow. М.: MAKS Press, 2014. pp. 72-74.

Investigation of vibrofluidized granular layer modes using OpenFOAM

^{1,2,3} N.S. Orlova <norlova.umi.vnc@gmail.com>

² Ya.N. Kachalkina <yankevich-2502@mail.ru>

¹ South Mathematical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and the Government of Republic of North Ossetia-Alania, Russia, Vladikavkaz, Marcus street, 22

² North-Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Russia, Vladikavkaz, Nikolaev street, 44

³ Financial University under the Government of the Russian Federation, Russia, Vladikavkaz, Molodezhnaya street, 7

Abstract. Vibrofluidization is widely used in various industrial processes. So the study of vibrofluidization modes is current research. In this paper we investigated the modes of vibrofluidized layer using the package OpenFOAM. The results of modelling of the vibrofluidized layer dynamics at different values of the amplitude and frequency of oscillations, the thickness of the filling, were presented. The modes in which layer becomes unstable were identified. Wavelets formed from granular material and the jetting channels appear in these modes.

Key words: vibrofluidized layer, granular material, mathematical modeling, OpenFOAM, twoPhaseEulerFoam, vibrofluidization modes

References

- [1]. N.S. Orlova. Testirovanie dvuh modeley vibroozhizhennogo sloya. [Testing of two models of vibrofluidized layer]. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tehnicheskie nauki. [Proceedings of the universities. North Caucasus region. technical sciences] 2012, no. 2, pp. 42-45 (in Russian)
- [2]. N. S. Orlova. Comparison of calculations by the two-field vibrofluidized-bed model with experimental data. Journal of Engineering Physics and Thermophysics vol. 85, no. 6, pp 1305-1310. doi 10.1007/s10891-012-0775-x
- [3]. N. S. Orlova. Comparison of the Results of Experimental Investigations of a Vibrofluidized Bed with Calculations by a Granular Gas Hydrodynamic Model. Journal of Engineering Physics and Thermophysics vol. 87, no. 2, pp 443-449. doi 10.1007/s10891-014-1030-4
- [4]. Konsol na upravlyayuschiy uzel klastera (2012), "BL2x220 Cluster Console" // URL: <https://unihub.ru/resources/bl2x220cc> (data obrascheniya: 10.06.2014). [Console to the

- control node of the cluster (2012), "BL2x220 Cluster Console" // URL: <https://unihub.ru/resources/bl2x220cc> (date of treatment: 10.06.2014).]
- [5]. E.S. Kamenetskiy, N.S. Orlova, M.V. Volik, D.G. Minasyan. Issledovanie dinamiki kipyaschego granulirovannogo sloya s ispolzovaniem paketa OpenFoam. [The study of the dynamics of fluidized granular layer using the package OpenFoam.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennyye nauki. [Proceedings of the universities. North Caucasus region. natural sciences] 2014, no. 5, pp. 37-42 (in Russian)
- [6]. H. Rusche. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. 2002. 343 p.
- [7]. B. van Wachem. Derivation, Implementation, and Validation of Computer Simulation Models for Gas-Solid Fluidized Beds – Dissertation at Delft University of Technology. 2000. 222 p.
- [8]. D. Gidaspow. Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions. Boston: Academic Press Inc., 1994. 211 p.
- [9]. N.S. Orlova, M.V. Volik. Modelling of vibrofluidized bed dynamics using OpenFoam. Waves and vortices in complex media: 5-th International Scientific School of Young Scientists, November 25-28, 2014, Moscow. M.: MAKS Press, 2014. pp. 72-74.

